Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada
Sciences des écosystèmes et des océans | Ecosystems and Oceans Science

Région du Pacifique

Secrétariat canadien de consultation scientifique
Réponse des Sciences 2016/007

EXAMEN TECHNIQUE DE LA MODÉLISATION FINALE EN 3D DES EFFETS POTENTIELS DES STRUCTURES MARINES SUR L'HYDRODYNAMIQUE DU SITE ET LE TRANSPORT DES SÉDIMENTS DÉCOULANT DE LA CONSTRUCTION D'UN TERMINAL DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ DANS LE NORD-OUEST DU PACIFIQUE

1.0 Contexte

Pacific NorthWest Liquid Natural Gas Ltd. (PNW LNG) propose la construction d'un grand terminal d'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL) à proximité de Prince Rupert (C.-B.), dans l'estuaire de la rivière Skeena (terminal appelé ci-après le « Projet »). Le projet comprendrait la construction d'un pont suspendu et d'un pont sur chevalets combinés reliant l'île Lelu à un poste d'amarrage, d'une installation de déchargement de matériaux, d'un quai initial et d'un pont d'accès à l'île Lelu.

Le projet de pont suspendu relierait l'île Lelu à la berge Agnew, à environ 1 500 m au nord-ouest de la berge Flora, et serait soutenu par deux structures de soutien dans l'eau isolées, appelées la tour sud-ouest et le bloc d'ancrage. À partir de l'extrémité du pont donnant vers le large, un pont sur chevalets soutenu par des pieux en acier se prolongerait sur environ 1 300 m pour atteindre un poste d'amarrage et une plateforme de circulation.

Le 8 avril 2013, l'Agence canadienne d'évaluation environnementale (l'ACEE) a publié un Avis de lancement selon lequel elle avait entamé une évaluation environnementale conformément à la *Loi canadienne sur l'évaluation environnementale* (LCEE, 2012) pour le projet de gaz naturel liquéfié Pacific NorthWest situé sur l'île Lelu.

L'énoncé des incidences environnementales (EIE) et l'addenda soumis par PNW LNG à l'Agence canadienne d'évaluation environnementale le 28 février 2014 et le 12 décembre 2014, respectivement, donnaient des renseignements concernant les effets possibles des opérations maritimes et des structures maritimes sur le plancher océanique et l'habitat des berges Agnew et Flora. L'addenda fournissait aussi des réponses détaillées aux demandes de renseignements soumises par le gouvernement du Canada concernant l'accumulation de sédiments, y compris un rapport fournissant une analyse du transport et de l'accumulation de sédiments. Ce rapport s'appuyait sur un travail qui utilisait des modèles en deux dimensions mené par un expert-conseil en ingénierie navale de PNW LNG, Hatch Ltd.

Le 23 février 2015, PNW LNG a reçu une nouvelle demande de renseignements de la part de l'ACEE, qui demandait une modélisation supplémentaire en trois dimensions de l'hydrodynamique et de la sédimentation. Un cadre de référence a été élaboré pour guider l'évaluation supplémentaire. Le promoteur a répondu à la demande de l'ACEE du 23 février en présentant un rapport daté du 5 mai 2015 intitulé « Modélisation en trois dimensions des effets potentiels des structures maritimes sur l'hydrodynamique et la sédimentation du site » (Hatch 2015a).

La Direction des sciences de Pêches et Océans Canada avait fourni des conseils informels au Programme de protection des pêches (PPP) au sujet des ébauches antérieures sur la modélisation de référence et la modélisation après-construction entreprises par PNW LNG en vue d'évaluer les effets possibles des opérations maritimes et des structures maritimes sur le plancher océanique et l'habitat des berges Agnew et Flora. Après la présentation du rapport (Hatch 2015a) par le promoteur, le 5 mai 2015, le PPP a demandé à la Direction des sciences de fournir un examen technique formel de l'ébauche de modélisation en trois dimensions de l'hydrodynamique de référence et après-construction de PNW LNG. La réponse des Sciences du Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS) [MPO 2015] a été rédigée pour satisfaire à cette demande du PPP. La réponse des Sciences du SCCS (MPO 2015) soulignait les principaux domaines de préoccupation à propos du rapport de modélisation en trois dimensions soumis par Hatch (2015a). Ces préoccupations ont été transmises à l'ACEE dans le cadre d'une réponse de Pêches et Océans Canada (le 2 juin 2015).

Le 2 juin 2015, la société PNW LNG a reçu un avis de la part de l'ACEE soulignant qu'elle n'avait pas satisfait aux exigences de la demande d'information n° 2 et notant qu'à la lumière des examens techniques fournis par Ressources naturelles Canada (RNCan) et le MPO, on pouvait observer « que les conseils d'experts et les directives fournis à PNW quant à ses travaux de modélisation n'ont pas été suivis d'assez près, ce qui a entraîné un manque de renseignements ». L'ACEE a indiqué à PNW LNG que ses conclusions devaient être corroborées par des résultats de modélisation encore plus rigoureux et approfondis. L'ACEE a informé PNW LNG que des renseignements supplémentaires étaient requis avant de pouvoir terminer son rapport d'évaluation environnementale. Cinq préoccupations principales au sujet de la modélisation en trois dimensions ont été recensées dans la correspondance de la LCEE datée du 2 juin 2015. Elles étaient détaillées comme suit :

- préoccupations à l'égard des champs de forçage du vent et des vagues utilisés pour alimenter le modèle en 3D;
- préoccupations à l'égard de la modélisation des tempêtes violentes;
- préoccupations à l'égard de la modélisation des débits à proximité des grandes structures (bloc d'ancrage et tour sud-ouest);
- préoccupations à l'égard des simulations à long terme et de l'utilisation de données de forçage moyennées dans le temps pour alimenter le modèle;
- préoccupations à l'égard des résultats du modèle en matière de transport des sédiments.

PNW a répondu à la demande d'information de l'ACEE du 2 juin 2015 en soumettant un rapport en date du 10 novembre 2015 intitulé « Pacific Northwest LNG 3D Modelling Update – Supplemental Modelling Report » (Hatch 2015b). Le Programme de protection des pêches du MPO demande à présent que le Secteur des sciences du MPO examine l'ultime soumission de PNW LNG concernant la modélisation des effets potentiels des structures proposées sur les secteurs des berges Flora et Agnew en réponse à la demande d'information de l'ACEE et fournisse des conseils concernant les points suivants :

1. évaluer si les cinq préoccupations principales exposées ci-dessus ont été abordées avec suffisamment de précision et de pertinence pour faciliter l'évaluation des conclusions de PNW LNG;
2. si les renseignements et les résultats de la modélisation fournis par PNW LNG sont jugés suffisants, évaluer la validité des conclusions de PNW LNG en s'appuyant sur les renseignements et les résultats présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire.

La présente réponse des Sciences découle du processus de réponse des Sciences de décembre 2015 sur l' Examen technique de la modélisation finale en 3D des effets potentiels des structures marines sur l'hydrodynamique du site et le transport des sédiments découlant de la construction d'un terminal de gaz naturel liquéfié dans le nord-ouest du Pacifique.

2.0 Analyse du rapport de modélisation supplémentaire

La présente section fournit un examen du rapport de modélisation supplémentaire (Hatch 2015b), en ce qui concerne les cinq préoccupations soulevées par l'ACEE à propos du travail de modélisation présenté dans le rapport précédent (Hatch 2015b) afin de répondre à la question 1 ci-dessus. Pour chacune de ces préoccupations, des renseignements de référence sont fournis et la réponse du promoteur est résumée. Dans chaque cas, une évaluation est effectuée afin de déterminer si les travaux présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire (Hatch 2015b) sont pertinents et suffisamment précis pour permettre une évaluation de l'impact du projet sur la berge Flora. Dans la troisième section, les principaux résultats sont mis en évidence pour aider le Programme de protection des pêches du MPO dans le cadre de son évaluation du projet. La dernière section résume le document et recommande des mesures d'atténuation possibles que le Programme de protection des pêches du MPO pourrait envisager.

2.1 Données de forçage du vent et des vagues

2.1.1 Renseignements généraux

Afin d'examiner les répercussions potentielles du projet sur les berges Flora et Agnew, PNW LNG a mis en œuvre un modèle hydrodynamique régional fondé sur le modèle Delft3D (Deltares 2014a et 2014b). Ce modèle est adapté à une représentation de l'hydrodynamique des débits sur le site du projet, y compris de la simulation des courants poussés par les vagues (au moyen du modèle de vagues SWAN [Simulating WAves Nearshore]) et des changements morphologiques des fonds associés au dépôt de sédiments et à l'érosion. Le modèle régional est alimenté par le forçage des vents à la surface et, à ses limites ouvertes latérales, par les vagues entrantes (houle) provenant du Pacifique. Un examen technique précédent de cette modélisation par le MPO (MPO 2015) remettait en question l'approche adoptée pour préciser ces forçages du modèle régional qui, d'après ce document, aurait pour effet d'introduire des erreurs inutiles. Plus précisément, les éléments suivants y étaient jugés inadéquats :

1. l'utilisation de données sur les vents provenant d'une seule bouée pour définir le forçage du vent sur l'ensemble du domaine régional, provoquant un champ de vent uniforme. Il était indiqué que l'utilisation de données maillées sur les vents était plus adaptée, car ces données permettraient la définition de données sur les vents réalistes et variables dans l'espace pour l'ensemble de la région;
2. la définition de données sur les vagues uniformes à la limite extérieure du modèle, basées également sur les données issues d'une seule bouée. Il était noté que « les mesures prises à un seul point ne peuvent représenter la variabilité du champ de vague le long de la totalité de la limite extérieure du maillage régional du modèle de vague ». Il était en outre indiqué que l'utilisation des données maillées disponibles pour définir le forçage des vagues aux limites permettrait de réduire les erreurs inutiles et d'améliorer les simulations.

2.1.2 Révisions du promoteur

Le travail présenté dans le rapport de modélisation supplémentaire utilise à présent des données maillées sur les vents pour fournir des champs de vent variables dans l'espace qui servent à pousser les courants et les vagues produites localement dans le modèle régional. Le

rapport indique que quatre produits de réanalyse distincts ont été envisagés pour permettre le forçage du vent dans le domaine du modèle. Le forçage du vent provenant de la version 2 du produit Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) a été choisi pour alimenter le modèle, car ces données modélisées sur les vents présentaient la résolution spatiale la plus fine et la couverture la plus complète des quatre ensembles de données maillées sur les vents envisagés. Une comparaison de la résolution de ces quatre ensembles de données est présentée à la figure C1 de l'annexe C pour soutenir le choix du CFSR par le promoteur.

En plus de la révision du forçage du vent, le modèle régional est désormais alimenté à ses limites latérales par des données variables dans l'espace sur les vagues au large. Deux produits de données ont été envisagés : WAVEWATCH III®, un produit normalisé mis à disposition par la National Oceanic and Atmospheric Administration du département du Commerce des États-Unis, et le produit de réanalyse des données sur les vagues du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Le produit WAVEWATCH III® a finalement été choisi, car il offrait une résolution spatiale supérieure. Dans les simulations du modèle de vagues, les profondeurs d'eau étaient tirées d'estimations provenant des simulations du débit.

2.1.3 Évaluation

Les forçages du vent et des vagues qui ont été intégrés dans le modèle afin de produire les résultats présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire représentent une nette amélioration par rapport aux travaux précédents; ces données sont conformes aux articles scientifiques examinés par les pairs portant sur les forçages à utiliser dans les modèles régionaux. En conséquence, le MPO estime que la préoccupation soulevée par l'ACEE à cet égard a été résolue d'une manière suffisamment exacte et pertinente par le promoteur. Par rapport aux simulations précédentes, les simulations menées avec ces forçages du vent et des vagues révisés se comparent plus favorablement aux observations des vagues effectuées au niveau d'une bouée déployée par PNW à proximité du site du projet. Cette amélioration est principalement attribuable à l'utilisation de vents variables dans l'espace. Cependant, en ce qui concerne les observations réalisées au niveau de la bouée de PNW, les conditions étaient suffisamment calmes pour que les vagues du large semblent avoir des répercussions relativement faibles sur le site du projet; pour des conditions correspondant à des tempêtes violentes de période de récurrence de 50 ans et 100 ans (section suivante), des répercussions plus importantes des vagues du large seraient attendues sur le site du projet. Une comparaison avec les vents mesurés à des bouées dans le détroit d'Hécate et l'Entrée Dixon a permis d'obtenir une très bonne concordance avec les vents du CFSR (figure C-2). Cela n'est pas surprenant, car il est très probable que les vents observés à ces bouées ont été intégrés dans ce produit de réanalyse. Le rapport indique que les vents du CFSR avaient été « améliorés localement en y intégrant les vents à Holland Rock avec une durée équivalente à 90 minutes ». La mesure dans laquelle cette intégration était nécessaire est incertaine, car les vents à Holland Rock sont probablement déjà intégrés à l'ensemble de données du CFSR.

2.2 Modélisation des tempêtes violentes

2.2.1 Renseignements généraux

Les répercussions potentielles des structures maritimes proposées sur la berge Flora en cas d'événements météorologiques extrêmes sont un facteur important à prendre en compte. En fait, dans un contexte de changement climatique, les conditions peuvent varier et les phénomènes extrêmes présentant de longues périodes de récurrence doivent être examinés avec soin. Le MPO (2015) a constaté que la modélisation des tempêtes présentée dans Hatch

(2015a) n'était pas pertinente s'agissant de l'intensité, de la durée et de l'orientation des tempêtes envisagées. Plus précisément, l'examen formulait la conclusion suivante :

« L'analyse n'envisage pas correctement la tempête extrême de période de récurrence de 50 ans ni une série de tempêtes extrêmes de période de récurrence de 50 ans, sous-estimant ainsi les répercussions potentielles de l'installation des structures maritimes sur le milieu environnant. Même si le promoteur estime les vents de période de récurrence de 50 ans et de 100 ans au niveau de la bouée de Holland Rock [...] plusieurs des autres conditions requises pour estimer les répercussions d'une tempête extrême de période de récurrence de 50 ans sont réduites, voire inexplorées. Notamment, l'analyse n'envisage qu'une direction pour la propagation de tempête, orientant les structures maritimes en aval de la berge Flora, ce qui rend par nature impossibles les répercussions de ces structures maritimes sur la berge Flora. »

Le MPO (2015) indiquait ensuite qu'un examen attentif des tempêtes nécessitait les éléments suivants :

« La direction de ce scénario artificiel devrait présenter différentes possibilités, notamment des cas dans lesquels les vagues passent d'abord la berge Flora avant de passer les structures maritimes, et inversement, avec les vagues frappant en premier lieu les structures maritimes, puis la berge Flora, etc. [...] Les scénarios relatifs à la tempête extrême devraient également envisager des tempêtes dans lesquels des vents constants soufflent sur les structures maritimes, la berge Flora et la berge Agnew selon différents angles, et demeurent constants pendant au moins une demi-journée, voire plus. Ces scénarios devraient également inclure des simulations avec ou sans les structures maritimes afin d'observer l'ensemble des effets de ces dernières sur la région environnante. Les simulations du modèle devraient montrer l'ensemble des effets possibles. Les vents devraient être déterminés en fonction d'une période de récurrence de 50 ans, au minimum, et devraient également inclure, dans l'idéal, une période de récurrence de 100 ans. »

2.2.2 Révisions du promoteur

L'annexe G du rapport de modélisation supplémentaire décrit l'approche adoptée pour générer une série de tempêtes artificielles. Sur les quatre scénarios envisagés, trois sont menés avec les structures maritimes en amont de la berge Flora avec des directions de vent passant du nord-ouest, à l'ouest et au sud-ouest. Le quatrième scénario présente des vents provenant du sud-est. Dans chaque cas, l'ampleur du forçage du vent est définie en fonction d'une période de récurrence de 50 ans estimée à partir de 21 ans d'enregistrements des vents mesurés par Environnement Canada à la station Holland Rock, située à proximité. La tempête artificielle se voit attribuer une dépendance temporelle de type gaussien avec une durée de 11 jours, et une échelle de temps de réponse e d'environ 5 jours. Les directions du vent demeurent constantes tout au long de la tempête. Les scénarios de tempête sont choisis de manière à coïncider avec une période de marées de vives-eaux, permettant ainsi une combinaison de puissants courants de marée et de puissants courants poussés par les vents et les vagues.

2.2.3 Évaluation

Le scénario de tempête violente artificielle élaboré dans le rapport de modélisation supplémentaire (annexe G) satisfait aux exigences indiquées dans le document du MPO (2015) s'agissant de la définition d'une tempête violente. En plus de définir des vents d'une intensité suffisante, une approche prudente a été adoptée en utilisant une durée de tempête artificielle considérablement plus longue que n'importe quelle tempête observée dans les 21 années d'enregistrement des vents mesurés à la bouée de Holland Rock. Par conséquent, les vagues générées par la tempête ne seront pas limitées par sa durée. Comme le laisse entendre le document du MPO (2015), plusieurs directions du vent ont été définies de façon à ce que les

structures maritimes proposées, dans les différents scénarios, se trouvent en amont ou en aval des vents par rapport à la berge Flora. Par conséquent, une houle présentant une longue course des vagues et pouvant être produite par de puissants cyclones dans le nord-ouest du Pacifique, se propageant vers la zone de la berge Flora à partir du nord-ouest, est incluse dans le modèle. Le MPO estime que les tempêtes artificielles définies dans le rapport de modélisation supplémentaire en vue d'examiner la réaction de la structure à un événement météorologique extrême sont suffisantes et que cette préoccupation soulevée par l'ACEE a été résolue de manière adéquate.

2.3 Modélisation des débits à proximité des grandes structures maritimes (bloc d'ancrage et tour sud-ouest)

2.3.1 Renseignements généraux

Le projet présenté par le promoteur requiert l'installation de structures maritimes qui s'étendent à travers la colonne d'eau à proximité de la façade nord-ouest de la berge Flora. Comme nous l'indiquions plus haut, ce projet consiste en la construction d'un pont soutenu par la tour sud-ouest et le bloc d'ancrage ainsi que d'un pont sur chevalets soutenu par une série de pieux. Comme le mentionnait la réponse des Sciences 2015/027 (MPO 2015), la tour sud-ouest et le bloc d'ancrage sont les structures les plus grandes et les plus importantes; les travaux de modélisation présentés dans le rapport de modélisation en trois dimensions du 5 mai 2015 (Hatch 2015a) semblaient indiquer que ces structures seraient celles qui produiraient les perturbations les plus importantes au régime d'écoulement naturel de la région.

Le rapport de Hatch (2015a) présentait des travaux de modélisation dans lesquels les structures maritimes (à savoir le bloc d'ancrage, la tour sud-ouest et la série de pieux du pont sur chevalets) étaient représentées dans le modèle régional Delft3D (Flow) comme des « plaques poreuses » exerçant un effet de résistance sur le débit. Cette représentation était acceptée dans l'examen du MPO comme une approche raisonnable pour l'ensemble des supports du pont sur chevalets. (Une analyse plus approfondie à propos des supports du pont sur chevalets est fournie ci-dessous.) Toutefois, l'examen du MPO était critique à propos de l'utilisation de la représentation de la tour sud-ouest et du bloc d'ancrage sous forme de plaques poreuses. Plus précisément, l'examen du MPO indique l'effet hydrodynamique qui devrait se produire à proximité de ces grandes structures :

« [...] les écoulements touchant de grosses structures de ce type seront bloqués du côté en amont et accéléreront le long des flancs de l'obstacle. Au niveau du bord de fuite, on observera une séparation de la couche limite de l'écoulement et un sillage de turbulence sur la face abritée des structures. Au vu de la proximité du projet de structures avec la berge Flora, des jets et des tourbillons qui se trouveront sur la face abritée de la structure pourraient toucher les rives de la berge au cours de la marée montante. Ces écoulements puissants ont le potentiel d'éroder la berge. »

Il était noté que la représentation des grandes structures sous la forme de plaques poreuses avait peu de chances de produire une représentation exacte des changements attendus dans le régime hydrodynamique :

« La résolution relativement grossière du modèle (qui nécessite le paramétrage de la plaque poreuse) pose problème pour la modélisation des effets des deux plus grandes structures (le bloc d'ancrage et la tour); il est difficile de déterminer si les effets de ces structures sont représentés de manière adéquate. Il est notamment probable que le modèle ne soit pas en mesure de traduire adéquatement les écoulements puissants et l'effet de cisaillement générés sur la face abritée des structures. Les écoulements turbulents et les tourbillons qui seront

constatés sur la face abritée du bloc d'ancrage et de la tour sont probablement absents des simulations, et les jets séparés sont forcément plus diffus que dans la réalité. Tous ces éléments sont susceptibles d'influencer les résultats et de sous-estimer les effets de ces grandes structures. »

Enfin, pour surmonter cette difficulté, l'examen du MPO proposait ce qui suit :

« Le remède évident à ces problèmes aurait consisté à mener des simulations qui présentent des résolutions beaucoup plus élevées à l'échelle locale (peut-être dans le cadre d'un modèle imbriqué) dans lesquelles les structures maritimes et les écoulements turbulents sont explicitement traduits. »

2.3.2 Révisions du promoteur

En réponse à la critique énoncée ci-dessus, le promoteur a mis en œuvre des modèles à deux dimensions et à haute résolution pour les régions situées à proximité de chacune de ces deux grandes structures. Le système de modélisation MORPHO (Kolomiets *et al.* 2014) a été choisi pour simuler à une échelle plus fine les processus physiques autour de la tour sud-ouest et du bloc d'ancrage sud-ouest du projet. Les conditions limites pour ces modèles à haute résolution ont été tirées du modèle régional à résolution plus grossière Delft3D. MORPHO permet de modéliser l'inondation et l'assèchement du fond marin, un élément important pour la berge Flora. Ce modèle utilise une grille non structurée et a été mis en œuvre avec une résolution latérale variable qui est de plus en plus fine à mesure que l'on se rapproche des structures (taille de grille d'environ 1,5 m à proximité immédiate de ces dernières) et qui devient de plus en plus grossière à mesure que l'on s'en éloigne, pour atteindre environ 200 m à proximité des limites du domaine en haute résolution.

Le rapport de modélisation supplémentaire et les animations vidéo jointes fournissaient les résultats obtenus à partir d'une série de simulations réalisées à partir des modèles à haute résolution. Ces simulations comprenaient des simulations de modèle à haute résolution dans le cadre de trois scénarios distincts au bloc d'ancrage et à la tour sud-ouest :

1. scénario basé sur les élévations de la surface de la mer et les courants engendrés par les marées et les débits des rivières provenant des crues nivales pendant une période de simulation de 28 jours;
2. scénario semblable au premier point, mais uniquement avec le forçage des marées;
3. scénario basé sur les courants de marées et de tempêtes liés à des vents/vagues d'ouest (270°N) dans le cadre d'une simulation de tempête présentant une période de récurrence de 50 ans.

Le promoteur a également fourni des essais de sensibilité analysant l'influence des variations dans la granulométrie des sédiments, des changements liés à la mise en place d'une protection contre les affouillements autour des structures et d'un changement de la forme de la tour sud-ouest (passage d'une forme de base rectangulaire à une forme circulaire) sur les résultats principaux.

Généralement, les résultats de ces simulations montrent les modifications apportées aux structures de débit prévues dans le document du MPO (2015). Plus précisément, ces modifications comprennent la formation de jets sur les flancs des structures qui empiètent localement sur les rives de la berge Flora au cours de la marée montante. En outre, des tourbillons présentant des sens alternés se propagent dans le sillage des structures avant d'atteindre la berge au cours de la marée montante. Ce phénomène est semblable à une allée de tourbillons de von Karman; la fréquence de l'oscillation du courant sur la face abritée des

structures semble être conforme à cette interprétation (annexe 1 – Notes techniques pour la section 2.3).

Les simulations à haute résolution montrent qu'un certain affouillement des sédiments marins se produit au bord de la berge Flora en réaction aux débits générés sur la face abritée des structures au cours de la marée montante. Cela contraste avec les résultats précédents indiqués dans Hatch (2015a) qui étaient fondés sur une représentation sous la forme de plaques poreuses de ces grandes structures. Ledit document ne permettait de relever aucune érosion de la berge Flora associée à ces structures (se reporter aux figures 7.4 à 7.7, annexe B, du document Hatch Ltd [2015a]). Une analyse plus approfondie des résultats importants de la modélisation à haute résolution est incluse à la section 3 du présent examen.

2.3.3. Évaluation

Les nouvelles simulations à haute résolution représentent une amélioration claire et importante par rapport à la modélisation des débits précédente autour des deux principales structures. Plus précisément, ces nouvelles simulations répondent directement à la critique formulée quant à la représentation de ces structures sous la forme de plaques poreuses au sein d'une grille présentant une résolution trop grossière. Les simulations à haute résolution permettent d'afficher les processus physiques essentiels qui devraient survenir lorsque les débits entrent en contact avec ces grandes structures maritimes. Par conséquent, ces simulations réalisées à partir de modèles à haute résolution fournissent une base crédible pour évaluer les modifications engendrées par ces structures sur le régime hydrodynamique. Elles représentent également une base pour l'évaluation des répercussions de ces changements sur l'érosion, la dispersion et le dépôt des sédiments. En outre, la modélisation à haute résolution permet désormais l'analyse des effets d'une modification de la forme des structures et de l'installation d'une protection contre les affouillements.

Toutefois, une certaine prudence reste de mise dans l'interprétation des résultats de ces simulations. La réduction de la résolution de la grille à mesure que l'on s'éloigne des structures entraîne probablement une augmentation de la diffusion numérique implicite du modèle. En conséquence, les tourbillons qui se propagent dans la simulation du modèle sont susceptibles de subir de tels effets de diffusion et de se dissiper plus rapidement que si une haute résolution avait été conservée dans l'ensemble de la grille du modèle. Cela pourrait influencer la distance sur laquelle les tourbillons peuvent transporter les sédiments mis en suspension par les débits à proximité des structures. En particulier, les arguments liés aux échelles (annexe 1 – Notes techniques pour la section 2.3) semblent indiquer une dissipation des tourbillons par un frottement sur le fond sur une échelle de distance correspondant à environ 1 000 m, alors que les simulations montrent que ces tourbillons se dissipent sur une échelle relativement moindre. La diffusion numérique pourrait être à l'origine de cet écart.

2.4 Simulations à long terme

2.4.1 Renseignements généraux

L'un des objectifs de l'étude de modélisation en trois dimensions de Hatch (2015a) visait à examiner dans quelle mesure le projet donnerait lieu à des changements morphologiques à long terme sur la berge Flora en modifiant les processus à grande échelle liés aux débits et au transport des sédiments. Les simulations fondées sur le modèle Delft3D duraient 134 jours et intégraient un facteur d'accélération de l'évolution morphologique (MORFAC) de 13,5. Étant donné que la morphologie peut évoluer lentement, ce facteur est utilisé pour éviter les intégrations longues et coûteuses liées aux calculs de l'hydrodynamique. Pour ce faire, les flux de sédiments en suspension entre le fond marin et la couche liquide sus-jacente sont rajustés

par un facteur d'accélération appelé MORFAC. On estime ensuite que l'évolution morphologique simulée représente les changements prévus au cours de la période donnée par le produit du facteur MORFAC et de la durée réelle d'une simulation donnée. Dans le cas présent, les simulations ont été effectuées de manière à représenter des changements morphologiques sur une période de 13,5 fois 134 jours, soit 5 ans.

Le MPO (2015) a soulevé plusieurs préoccupations concernant le forçage des marées, le forçage du vent et la décharge d'eau douce provenant de la rivière Skeena appliqués aux simulations de l'hydrodynamique avec un facteur MORFAC supérieur à 1. En particulier, au lieu d'inclure le forçage des marées réel, les simulations n'incluaient qu'une « marée représentative » qui éliminait les modulations liées aux marées de vives-eaux et de mortes-eaux se produisant toutes les deux semaines. Les vents et les vagues étaient calculés en moyenne sur des intervalles de sept jours, et le cycle annuel du débit de la rivière était compressé en une période de 26,9 jours. L'examen indiquait ce qui suit :

« Le calcul de la moyenne hebdomadaire des vents et des vagues élimine les pics dans ces champs associés au passage de tempêtes, tandis que l'utilisation d'une marée représentative supprime les courants de marée les plus forts associés aux marées de vives-eaux. En conséquence, la probabilité de dépasser le seuil critique pour la mise en suspension et le transport des sédiments est sous-estimée dans ce modèle. En outre, la suppression des marées de mortes-eaux réduit la probabilité d'atteindre le seuil de dépôt des sédiments. »

En outre, le MPO (2015) notait que la compression du cycle annuel du débit de la rivière était très problématique. Par conséquent :

« Le volume d'eau douce et la quantité de sédiments en suspension déversés par la rivière Skeena dans les eaux côtières sont gravement sous-représentés dans le modèle. Cela provoquera une sous-estimation de la circulation induite par la poussée hydrostatique ainsi que du total des solides en suspension (TSS) dans la colonne d'eau. »

2.4.2 Révisions du promoteur

Une série de nouvelles simulations réalisées avec le modèle régional Delft3D est présentée dans le rapport de modélisation supplémentaire (Hatch, 2015b). Dans ces simulations, les forçages liés aux marées, aux vents, aux vagues et aux débits de la rivière varient constamment, sans l'utilisation de moyennes dans le temps, comme c'était le cas dans Hatch (2015a). Pour ces nouveaux scénarios, appelés dans le rapport simulations de séries chronologiques, aucune accélération morphologique n'a été appliquée (c.-à-d. le facteur MORFAC est fixé à un). Plusieurs scénarios distincts sont décrits. Trois simulations présentent des durées relativement longues. L'une d'entre elles dure un an, couvrant la période de septembre 2012 à septembre 2013, et présente un couplage toutes les heures entre les modules FLOW et WAVE. Deux autres simulations présentent un couplage toutes les trois heures entre ces deux modules, ce qui est moins exigeant sur le plan de la puissance de calcul; ces simulations couvrent les périodes de septembre 2012 à septembre 2013 et de mai 2013 à mai 2014. Ces simulations permettent de représenter le cycle annuel, y compris une période de tempêtes hivernales et une période de crue nivale pour le débit de la rivière Skeena. D'autres simulations plus courtes sont également présentées, avec des périodes de 3 à 4 mois pour les périodes de tempêtes hivernales et de crues nivales estivales.

Le promoteur a amélioré la modélisation océanique régionale en augmentant le nombre de couches verticales dans Delft3D de 5 à 10 pour répondre aux préoccupations relatives à la simulation de la salinité et de la stratification dans les environs de la berge Flora (annexe E). Ils ont aussi amélioré les comparaisons entre les courants observés et les courants modélisés en allongeant la période utilisée pour la comparaison dans le chenal Porpoise, en intégrant les

données provenant du passage Inverness et en utilisant des mesures quantitatives pour les comparaisons (annexe F).

2.4.3 Évaluation

Comme l'a demandé le MPO (2015), les nouvelles simulations à long terme utilisent un forçage variant en continu au lieu de moyennes hebdomadaires des vents et des vagues. Les résultats de ces simulations sont désormais plus crédibles que les précédents présentés dans le rapport du 5 mai. Le MPO estime que les préoccupations soulevées dans son document (MPO 2015) à propos de l'utilisation contestable de moyennes pour le forçage du vent et des vagues et d'une compression des données relatives aux débits d'eau douce de la rivière Skeena ont été résolues de manière adéquate. De plus, en corrigeant la représentation du débit de la rivière Skeena, les préoccupations relatives au rejet de sédiments en suspension provenant de cette rivière sont également atténuées.

L'observation des figures fournies à l'annexe F permet de déterminer que le niveau d'incertitude au cours de la période de courants de pointe par rapport aux observations menées dans le chenal Porpoise et le passage Inverness se chiffre à environ 20 %. Les documents présentés dans les annexes J et K ainsi que la comparaison de modèles de Chen *et al.* (2013) semblent indiquer que l'incertitude entourant la vitesse des courants touchant la berge (lorsqu'il n'y a pas d'observation) se situe dans la plage de 20 % à 40 % (cette incertitude s'applique tant au modèle régional qu'au modèle à haute résolution).

Dans l'ensemble, les incertitudes quant aux courants sont conformes aux attentes de la communauté internationale, à savoir que dans les situations dominées par les courants, les quantités de transport des sédiments, comme l'érosion et les taux de transport, devraient être exactes avec une marge correspondant à un facteur approximatif de 2 (chercheur de RNCan, comm. pers. 2015). Il convient de noter qu'une incertitude de 40 % s'agissant des courants signifie une d'incertitude d'un facteur de 2 pour la contrainte au fond.

Les simulations du modèle océanique régional sont utiles pour évaluer les conditions avant la construction et les répercussions potentielles du pont sur chevalets. Ces simulations présentent une résolution horizontale insuffisante pour évaluer convenablement les répercussions potentielles des deux grandes structures maritimes, à savoir la tour sud-ouest et le bloc d'ancrage.

Le MPO note qu'aucune accélération morphologique n'a été incluse dans les simulations sur une année; par conséquent, ces simulations ne modélisent pas les changements éventuels qui se produiraient sur plusieurs années. Un examen de RNCan axé sur la modélisation régionale a déterminé que « les répercussions des structures maritimes sur les courants, les vagues, le transport des sédiments et la morphologie du fond marin en fonction de diverses conditions saisonnières et de tempête ont été modélisées avec une certitude acceptable ».

2.5 Les résultats du modèle sur le transport des sédiments

2.5.1 Renseignements généraux

Dans le cadre d'un processus d'examen technique plus ancien, RNCan soulevait des préoccupations concernant les résultats du modèle sur le total des solides en suspension (TSS) et le transport des sédiments. Plus précisément, RNCan recommandait que « la direction et le taux de transport des sédiments » ainsi que « le flux de transport des sédiments net, la direction, le taux d'érosion net, le taux de dépôt net et les profils de répartition » soient inclus dans l'analyse des résultats du modèle. En outre, des préoccupations ont été soulevées concernant la sous-estimation du total des solides en suspension par le modèle. Enfin, il était

indiqué que les conclusions relatives à l'effet des structures maritimes sur le total des solides en suspension n'étaient pas soutenues par les résultats du modèle.

2.5.2 Révisions du promoteur

L'annexe K sur la mobilité et le transport des sédiments a été ajoutée par le promoteur pour répondre aux préoccupations susmentionnées. Cette annexe fournit un aperçu détaillé des calculs effectués pour le transport des sédiments et présente des estimations concernant la fraction de temps pendant laquelle les sédiments sont érodés au cours des simulations. Neuf emplacements ont été sélectionnés pour cette analyse (figure K-1) et tirent parti de la simulation sur les crues de 28 jours menée en 2014. Pour chaque emplacement, une série chronologique des débits par rapport à la vitesse critique du débit (déterminée à l'aide de la méthode de Shields) est présentée (figures K-14 à K-22). Il a été constaté que les sédiments étaient mis en mouvement par les courants de marée pendant une fraction relativement courte de la période de simulation (0,3 % à 21,8 %) lorsque le courant de marée de pointe dépassait l'estimation de la vitesse critique du débit, et que ces sédiments n'étaient pas transportés sur de longues distances. Une analyse semblable a été menée pour deux des emplacements à l'aide des résultats du modèle à haute résolution MORPHO, permettant d'obtenir des résultats identiques.

2.5.3 Évaluation

Le MPO a déterminé que les préoccupations soulevées concernant le caractère insuffisant des renseignements à l'appui pour la simulation des sédiments ont été résolues de manière adéquate. Une évaluation plus complète des prévisions du modèle régional concernant le transport des sédiments, l'érosion des fonds marins et le dépôt des sédiments a été fournie par RNCan.

3.0 Évaluation des résultats des modèles et conséquences

Dans cette section, les résultats présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire sont examinés en fonction des sujets ayant un intérêt majeur pour le Programme de protection des pêches du MPO.

Trois sujets essentiels sont pris en compte :

1. la possibilité d'une modification substantielle de la berge Flora;
2. les modifications du total des solides en suspension (TSS) sur la berge Flora;
3. les modifications des courants à proximité des structures.

3.1 Possibilité d'une modification substantielle de la berge Flora

3.1.1 Tour sud-ouest et bloc d'ancrage

Les résultats présentés par le promoteur ont constamment démontré que les perturbations des débits naturels ayant le plus grand potentiel de modification substantielle de la berge Flora sont associées aux deux plus grandes structures, la tour sud-ouest et le bloc d'ancrage. Les résultats des simulations à haute résolution sont les plus pertinents à cet égard, car ces scénarios offrent une résolution spatiale suffisante pour représenter les processus physiques dominants qui devraient se dérouler à proximité de ces grandes structures. Le scénario fondé uniquement sur les marées est probablement le plus utile, car c'est vraisemblablement celui qui fournit la meilleure représentation des conditions qui prévalent généralement pendant la plus grande partie de l'année. Le scénario combinant les marées et les crues nivales n'est pertinent que pour les périodes de débits fluviaux importants, lesquels se limitent à une période d'environ quatre semaines entre le printemps et le début de l'été.

Voici quelques-uns des résultats qui ressortent de la modélisation à haute résolution concernant la possibilité d'une modification substantielle de la berge Flora.

- Les simulations à haute résolution montrent qu'un certain affouillement des sédiments marins se produirait au bord de la berge Flora en raison des débits générés sur la face abritée des structures au cours de la marée montante. Cette érosion provoque une modification lente et graduelle du fond marin sur la bordure ouest de la berge Flora.
- Comme nous l'expliquons ci-dessous, cette lente et graduelle érosion peut persister pendant une période indéfinie, peut-être pendant de nombreuses années.
- L'érosion sur une période d'un an (basée sur une extrapolation linéaire d'une simulation de 28 jours) présente une superficie peu étendue et relativement éloignée des emplacements historiques des lits de zostère marine. C'est également le cas pour la simulation d'une tempête présentant une période de récurrence de 50 ans.
- Bien que le bloc d'ancrage soit plus imposant que la tour sud-ouest, il paraît évident, d'après les résultats, que le potentiel d'érosion sur la berge Flora découle principalement de la présence de la tour sud-ouest. Cet effet est dû à la direction des courants environnants et au fait que la tour sud-ouest devrait être située plus près de la berge.
- Dans le cas de la tour sud-ouest, le contour d'érosion de 5 cm par an se trouve dans la courbe isobathe de 3,8 m utilisée pour délimiter le bord de la berge Flora (se reporter aux figures 6-30, 6-39 et 6-44). La zone de la berge pour laquelle on constate une érosion de plus de 5 cm par an des sédiments présente une superficie environ deux fois plus importante que celle de la zone de la tour et de sa protection contre les affouillements dans le scénario des marées uniquement, et environ trois fois plus importante dans le scénario de tempête présentant une période de récurrence de 50 ans.
- La protection contre les affouillements (enrochement) est une mesure efficace pour atténuer l'affouillement à proximité immédiate des structures. Cela s'applique tant à la phase de construction qu'à la phase d'exploitation du projet. Il convient toutefois de remarquer que l'enrochement a peu d'influence au-delà des zones qu'il protège directement.
- Les simulations montrent une érosion considérablement réduite au bord de la berge Flora lorsque l'obstacle que représente la tour sud-ouest est de forme circulaire au lieu d'être de forme rectangulaire (se reporter aux figures 6-43 et 6-44). Cette mesure, si elle était prise, permettrait manifestement d'atténuer les répercussions potentielles de la tour sud-ouest sur la berge Flora. L'utilisation de structures temporaires arrondies plutôt que rectangulaires pendant la phase de construction, au besoin, serait une autre mesure d'atténuation appropriée.
- La composante relative aux crues nivales de la simulation portant sur les marées et les crues nivales permet d'obtenir un courant d'environ 5 cm/s, d'est en ouest, sur l'ensemble de la berge. Cela réduit effectivement le courant sur la berge au cours de la marée montante. Ainsi, l'érosion est légèrement inférieure au bord de la berge Flora dans le scénario combinant les marées et les crues nivales que dans le scénario ne portant que sur les marées.

3.1.2 Structures du pont sur chevalets

Le pont sur chevalets a été représenté dans le modèle régional comme une plaque poreuse qui exerce un effet de résistance sur le débit. Le niveau de cette résistance a été étalonné de manière à réduire les débits et l'énergie des vagues par un facteur de 0,9 (c.-à-d. par le blocage de 10 % de l'énergie des vagues et des courants). Étant donné que la conception des pieux du

pont sur chevalets est telle qu'ils bloqueront 1 à 2 % de la zone le long dudit pont, ce facteur de réduction est considéré comme prudent et susceptible de surestimer les effets des chevalets simples. La simulation d'une tempête violente présentant une période de récurrence de 50 ans (section 6.1.1; figure 6-7) indique que le pont sur chevalets serait le plus susceptible de modifier les modèles d'érosion nette et de dépôt le long du flanc ouest des berges Agnew et Flora, de l'angle nord-ouest de la berge Agnew à l'île Kitson. Pour vérifier les prévisions du promoteur, cette zone serait la plus appropriée pour envisager la surveillance des changements à long terme possibles dans la morphologie du fond marin. Par ailleurs, les résultats de la modélisation semblent indiquer l'impact du pont sur chevalets sur la berge Flora devrait être limité.

3.1.3 Autres incertitudes

Les simulations à haute résolution montrent de manière constante que la possibilité d'une modification substantielle de la berge se trouve à proximité immédiate de la tour sud-ouest Même si la durée des simulations est insuffisante pour fournir des renseignements sur l'évolution à long terme de la berge dans cette zone, le scénario le plus probable est celui d'une érosion lente et continue, à des taux semblables à ceux qui mis en évidence par la simulation à haute résolution portant uniquement sur les marées. La durée de cette érosion lente et continue reste incertaine.

Une analyse est proposée à la section 6.4 du rapport de modélisation supplémentaire concernant l'évolution à long terme de la berge en raison de l'affouillement à proximité de la tour sud-ouest et du bloc d'ancrage. De nombreuses études au sujet de l'affouillement sont citées pour faire valoir qu'un état stable sera atteint. La conclusion principale consiste à dire que, même si les tourbillons qui se propagent sur la face abritée du bloc d'ancrage et de la tour sud-ouest au cours de la marée montante entraînent une érosion allant au-delà de la protection contre les affouillements, un équilibre finira par être atteint, après quoi l'affouillement « ralentira jusqu'à un arrêt quasi total lorsque les sédiments entourant la structure seront trop profonds pour être mis en mouvement » [page 169]. Le promoteur soutient aussi que « les profondeurs d'équilibre autour de la bordure des enrochements de protection contre les affouillements devraient être atteintes dans un délai compris entre plusieurs mois et quelques années » [page 170]. Tout d'abord, il convient de noter que les simulations montrent que l'affouillement ne se limite pas à la bordure des protections contre les affouillements. À proximité de la tour sud-ouest, l'affouillement s'étend au-delà de la courbe isobathe de 3,8 m utilisée pour signaler le bord de la berge Flora (se reporter aux figures J-4 et J-56 pour le scénario portant uniquement sur les marées et celui portant sur la tempête, respectivement). De plus, il convient de souligner qu'aucune preuve n'a été apportée pour soutenir l'échelle de temps proposée concernant le délai de plusieurs mois à quelques années.

En fait, que ce soit à partir des simulations présentées dans le rapport de modélisation supplémentaire ou des ouvrages scientifiques cités, il est impossible de déterminer le temps qui sera nécessaire pour que l'affouillement s'interrompe et atteigne un état d'équilibre. Il est également impossible de fournir une estimation de l'ampleur de l'affouillement au final. Comme le souligne le rapport supplémentaire sur la modélisation (page 169) : « la vitesse de l'affouillement sera lente ». En conséquence, la modification fractionnelle de la profondeur du fond marin variera également lentement. Étant donné que l'affouillement « ralentira jusqu'à un arrêt quasi total une fois que les sédiments entourant la structure seront trop profonds pour être mis en suspension », il ne serait pas déraisonnable de s'attendre à ce qu'un tel processus se produise continuellement à proximité des structures pendant une longue période, peut-être même aussi longtemps que la durée de vie du projet. Comme nous l'abordons à la prochaine section, cet affouillement pourrait avoir des répercussions persistantes sur les niveaux de total des solides en suspension (TSS) sur la berge.

3.2 Modifications du total des solides en suspension (TSS) sur la berge Flora

La présente section examine les résultats des simulations de modèles à haute résolution concernant les modifications du total des solides en suspension (TSS) liées à l'installation de la tour sud-ouest et du bloc d'ancrage. Il convient de noter que même si la simulation portant sur les marées uniquement est considérée comme le scénario le plus représentatif des conditions typiques dans la zone, bon nombre des résultats abordés dans le rapport de modélisation supplémentaire sont tirés du scénario combinant les marées et les crues nivales. Par conséquent, en vue d'évaluer les modifications du TSS, il s'est avéré nécessaire de se fier davantage aux animations vidéo concernant le scénario portant sur les marées uniquement. Voici certains des principaux résultats concernant le TSS présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire et les animations illustrant les courants connexes.

- Les simulations montrent des augmentations du TSS sur le flanc ouest de la berge Flora en raison de la présence des structures maritimes, et plus particulièrement de la tour sud-ouest. Ces niveaux accrus de TSS découlent de l'érosion et de la mise en suspension des sédiments liées à l'augmentation des courants qui se développent à proximité des structures.
- Les animations illustrant les courants démontrent clairement qu'au cours de la marée montante, les tourbillons qui se propagent sur la face abritée des structures sont en mesure de transporter les sédiments en suspension à partir de la zone entourant les structures jusqu'à la berge.
- L'augmentation du TSS peut être considérée comme un événement de courte durée et épisodique qui a principalement lieu pendant les périodes de marées de vives-eaux, alors que les courants de marée sont forts (annexe 1 – Notes techniques pour la section 3.2). Les niveaux de TSS sont généralement plus faibles pendant les marées de mortes-eaux, alors que les courants de marée sont faibles (figure 6-35 du rapport de modélisation supplémentaire).
- De tels événements épisodiques peuvent également se produire dans les simulations qui ne tiennent pas compte des structures, mais à une fréquence moindre. Par exemple, dans la simulation combinant les marées et les crues nivales (figure 6-35 du rapport de modélisation supplémentaire) sans la tour sud-ouest, la concentration de TSS dépasse à trois reprises 5 mg/L pendant 28 jours à un emplacement situé à l'est de la tour sud-ouest. La même situation se reproduit à 14 ou 15 reprises sur une période semblable dans la simulation avec les structures maritimes, soit un chiffre 5 fois plus important. (Ici, nous ne tenons pas compte des deux pics de TSS qui se produisent avec et sans les structures maritimes et qui sont vraisemblablement des artéfacts liés à l'assèchement de la berge au cours des marées très basses.)
- L'examen de l'animation vidéo portant uniquement sur les marées montre que les augmentations épisodiques du TSS sur la partie ouest de la berge Flora peuvent être plus importantes, suivant un facteur de 3 à 4, que celles observées dans le scénario combinant les marées et les crues nivales (annexe 1 – Notes techniques pour la section 3.2).
- La figure 6-34 du rapport de modélisation supplémentaire, qui illustre l'augmentation instantanée maximale du TSS à proximité de la structure maritime au cours de la simulation de 28 jours combinant les marées et les crues nivales, présente une forte asymétrie est-ouest. Cette asymétrie est probablement attribuable à l'intégration des courants de crues nivales dans la simulation. Bien qu'aucune figure similaire n'ait été fournie pour le scénario plus représentatif portant uniquement sur les marées, toute tentative consistant à

compenser cette asymétrie entraîne des niveaux de TSS accrus à l'est de la tour sud-ouest comparables au facteur de 3 à 4 mentionné ci-dessus.

- Dans les simulations, le transport des solides en suspension atteint les lits de zostère marine les plus proches, qui se trouvent à environ 150 m à l'est de l'emplacement proposé pour la tour sud-ouest. La simulation portant uniquement sur les marées semble indiquer que les augmentations épisodiques du TSS peuvent avoir des valeurs de l'ordre de 9 à 30 mg/L à l'emplacement du lit de zostère marine le plus proche observé dans le cadre des relevés (à 150 m de la tour sud-ouest).
- Les essais de sensibilité indiquent qu'une modification de la forme de la tour sud-ouest, passant d'une forme rectangulaire à une forme circulaire, permet d'obtenir une réduction des niveaux de TSS. Cet élément est directement lié à la réduction de l'érosion en bordure de la berge permise par une tour circulaire.

3.2.1 Autres incertitudes

En ce qui concerne le TSS, des incertitudes demeurent en ce qui a trait à quatre points principaux :

- Il existe une incertitude concernant la durée pendant laquelle les changements des niveaux de TSS persisteront. Ce point est lié à la question de la persistance de la lente érosion aux environs des structures maritimes, et en particulier au niveau de la tour sud-ouest. Comme nous l'indiquions à la section 3.1.3, cette échelle de temps ne peut pas être estimée avec fiabilité à partir des résultats présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire. Il est possible que des niveaux de TSS relativement élevés persistent pendant plusieurs années sur la partie ouest de la berge Flora.
- Il existe une incertitude concernant la distance sur laquelle les sédiments en suspension seront transportés vers la berge Flora par les tourbillons qui se propagent sur la face abritée des structures au cours de la marée montante. Il est possible que le transport des sédiments soit limité par l'échelle de longueur de la dispersion des tourbillons. Comme le laisse entendre la section 2.3.3, cette échelle pourrait être sous-estimée dans les simulations en raison de la réduction de la résolution de la grille du modèle à mesure que l'on s'éloigne de la structure maritime, qui entraîne une augmentation de la diffusion numérique implicite du modèle.
- Il existe une incertitude quant à la durée des épisodes d'élévation des niveaux de TSS. Les résultats tels que ceux affichés à la figure 6-34 semblent indiquer qu'il existera des « pics » de TSS épisodiques et de courte durée sur la partie ouest de la berge Flora, et ces pics auront lieu au cours de la marée montante pendant les périodes de forts courants de marée. Il est toutefois difficile de fournir une estimation plus quantitative à partir des renseignements présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire. Une estimation peut être effectuée en supposant que, par exemple, les tourbillons présentent une échelle de largeur d'environ 100 m et qu'ils sont transportés par advection à une vitesse d'environ 0,25 m/s par le courant de fond. Ainsi, le passage d'un tourbillon chargé de sédiments au-delà d'un certain point prendra environ 10 minutes. En partant du principe que chaque cycle de marée compte plusieurs de ces tourbillons (disons 8 à 10), cela signifierait que les niveaux de TSS élevés se produiraient pendant une période d'environ 1,5 h. Si cela se produit environ 15 fois au cours d'une période de 28 jours, alors les périodes de concentrations élevées de TSS représenteraient environ 3 % du temps. Cela semble indiquer que des niveaux de TSS localement élevés n'auront lieu que pendant une petite fraction du temps, ce qui est généralement compatible avec le pic de TSS illustré à la figure 6-34.

- Enfin, même s'il paraît évident à partir de la simulation que les niveaux de TSS seraient considérablement réduits avec le passage à une forme circulaire pour la tour sud-ouest, il est impossible de fournir une estimation quantitative de cette réduction à partir des résultats présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire.

3.3. Modifications des courants à proximité des structures

3.3.1 Tour sud-ouest et bloc d'ancrage sud-ouest

Les simulations à haute résolution montrent que les structures entraînent des modifications aux courants de fond semblables à celles observées dans les débits présentant un nombre de Reynolds élevé autour des obstacles solides qui traversent la colonne d'eau (White 1979). Plus précisément, l'écoulement est bloqué en amont et accélère dans les couches limites sur les flancs des structures. Ces couches limites se séparent immédiatement en aval des structures. Des tourbillons présentant des sens alternés se propagent en continu en aval, selon un modèle semblable à une allée de tourbillons de von Karman (1979).

Les tourbillons se propageant en aval produisent des perturbations variant dans le temps et l'espace par rapport à des courants de marée de fond par ailleurs relativement uniformes sur la berge Flora. Ces perturbations variables comprennent des zones de courants intensifiés et réduits. Les résultats montrent que la tour sud-ouest et du bloc d'ancrage sud-ouest peuvent produire des tourbillons présentant des courants entre 1,5 et 2 fois supérieurs au courant de fond et se trouvant à une distance comprise entre 50 et 100 m des structures au cours d'une marée de vives-eaux (forte), et à une distance de 500 m au cours d'une tempête violente présentant une période de récurrence de 50 ans (pour plus de renseignements, se reporter à l'annexe 1 – Notes techniques pour la section 3.3). Les courants intensifiés se produiront sur la face abritée des structures – c'est-à-dire en aval par rapport à la direction du courant. Pendant les marées de vives-eaux, cela signifie des courants de 35 à 45 cm/s à des distances de 50 à 100 m des structures. Dans l'ensemble, à chaque cycle de marée (soit 12,4 h), ces courants intensifiés durent 2 à 3 h à l'est de la structure, puis trois heures plus tard, durent 2 à 3 h à l'ouest. La taille de la zone touchée par ces courants intensifiés représente une ou à deux fois celle de la structure. Ces courants intensifiés traverseront la colonne d'eau au niveau de la berge (l'eau y est peu profonde). Il convient également de noter que les courants associés aux tourbillons en aval varieront sur des échelles de temps relativement courtes (10 à 20 minutes) par rapport à la variation liée aux courants de marée.

Le promoteur indique (page xxi du Sommaire) que :

« [...] les résultats de la modélisation indiquent que des changements localisés des courants et des tourbillons auront clairement lieu à proximité de la tour sud-ouest et du bloc d'ancrage sud-ouest proposés (dans un rayon de quelques dizaines de mètres par rapport aux structures), mais que ces changements seront transitoires, mobiles et d'une ampleur limitée. »

Cet énoncé sous-estime l'étendue spatiale des courants intensifiés mis en évidence par les résultats du modèle.

3.3.2 Chevalets

Les chevalets sont modélisés comme des éléments de frottement (plaques poreuses) dans les simulations menées à l'aide du modèle régional (Delft-3D) et entraînent donc des courants légèrement plus faibles pour l'eau les traversant. Étant donné que les chevalets ne bloquent que 1 à 2 % de la zone longeant le pont sur chevalets (page 10), leur impact devrait se limiter à la proximité immédiate des chevalets simples.

3.3.3 Autres incertitudes

Comme c'est presque toujours le cas, le nombre de Reynolds des courants réels sera plus important que celui indiqué par les simulations numériques. Par conséquent, dans les courants réels, nous constaterons invariablement des turbulences plus importantes dans le sillage des principales structures que celles observées dans les simulations à haute résolution. En outre, la propagation des tourbillons pourrait être plus chaotique et moins périodique que dans les simulations.

Conformément à la section 2.3.3, le MPO estime que les tourbillons se propageront plus loin vers la berge que ne l'indiquent les simulations et que, par conséquent, les courants intensifiés s'étendront plus en aval des deux principales structures. Dans des conditions de marées typiques, le MPO maintient qu'une distance de 100 à 200 m représenterait une estimation prudente de l'ampleur des courants intensifiés (de 35 à 45 cm/s).

4.0 Conclusions

Voici les principaux résultats du présent examen :

- Le MPO conclut que le rapport de modélisation supplémentaire (Hatch 2015b) répond d'une manière pertinente et suffisamment détaillée aux préoccupations exprimées par l'ACEE dans sa lettre du 2 juin 2015 au promoteur. En conséquence, le MPO conclut que l'information transmise par le promoteur est suffisante pour mener un examen et que la méthode de modélisation est pertinente pour évaluer les répercussions potentielles du projet sur la berge Flora.
- Le modèle océanique régional, basé sur Delft3D, est suffisant pour décrire les conditions de référence (avant la construction) et évaluer les répercussions potentielles des pieux utilisés pour soutenir le pont sur chevalets.
- Les résultats de la modélisation à haute résolution sont les plus pertinents pour évaluer les répercussions potentielles des deux grandes structures maritimes, à savoir la tour sud-ouest et le bloc d'ancrage sud-ouest.

Les résultats qui ressortent des travaux de modélisation présentés dans le rapport de modélisation supplémentaire (Hatch 2015b) sont les suivants :

- Les simulations montrent que la tour sud-ouest et le bloc d'ancrage sont les structures maritimes les plus susceptibles d'avoir des répercussions sur la berge Flora. En parallèle, les résultats montrent que les pieux du pont sur chevalets pieux devraient avoir des répercussions très faibles sur la berge Flora en raison de leur petite taille.
- La tour sud-ouest est plus susceptible d'avoir des répercussions que le bloc d'ancrage sud-ouest sur la berge Flora, non seulement en raison de l'orientation des courants environnants, mais aussi parce qu'elle est située plus près de la bordure de la berge.
- Les simulations à haute résolution montrent qu'un affouillement des sédiments marins se produit au-delà de la protection contre les affouillements au bord de la berge Flora en raison des débits générés sur la face abritée des grandes structures au cours de la marée montante. Cette érosion pourrait provoquer une modification lente et graduelle du fond marin au bord ouest de la berge Flora. Ladite érosion présente une superficie peu étendue et relativement éloignée des emplacements historiques des lits de zostère marine se trouvant sur la berge Flora.

- Les simulations montrent que l'érosion au-delà de la protection contre les affouillements donnera lieu à des augmentations épisodiques des concentrations de total des solides en suspension (TSS) sur la berge Flora au cours de la marée montante, lorsque les courants de marée sont forts (marées de vives-eaux).
- Les résultats des simulations indiquent que les augmentations épisodiques du TSS peuvent durer quelques heures et s'étendre à quelques centaines de mètres de la tour sud-ouest, en direction de la berge. Il convient de noter que ces résultats diffèrent clairement de l'affirmation formulée dans le Sommaire selon laquelle « les effets hydrodynamiques qui produisent une érosion et un dépôt de sédiment, ou des modifications dans les niveaux de TSS, se dissipent dans un rayon de quelques dizaines de mètres à partir des structures » (page xviii du rapport de modélisation supplémentaire, Hatch 2015b).
- Les simulations montrent un affouillement considérablement réduit lorsque l'obstacle que représente la tour sud-ouest est de forme circulaire au lieu d'être de forme rectangulaire. Cette modification devrait également permettre une réduction des niveaux de TSS. Il existe une forte incertitude concernant le temps nécessaire pour qu'un équilibre soit atteint et pour que l'affouillement parvienne à un arrêt relatif.

Les recommandations à envisager par le Programme de protection des pêches sont les suivantes :

1. Il convient de recommander des structures maritimes de forme circulaire, car cette forme devrait réduire l'affouillement en bordure de la berge Flora tout en atténuant l'accroissement des niveaux de TSS. Des structures circulaires (p. ex. un batardeau circulaire) seraient également utiles pour réduire l'affouillement et les niveaux de TSS au cours de la phase de construction du projet.
2. Nous recommandons une surveillance des changements morphologiques et des niveaux de TSS sur la berge Flora. La durée d'un tel programme de surveillance est incertaine, compte tenu de l'incertitude concernant le temps nécessaire à l'atteinte d'une profondeur d'équilibre pour l'affouillement. Il est concevable qu'un tel programme puisse durer plusieurs années. La surveillance devrait être menée à des intervalles plus rapprochés au début du projet afin de vérifier les prévisions du modèle du promoteur concernant la lenteur et la faiblesse du taux d'érosion. Par la suite, les conditions pourraient être surveillées à des intervalles plus espacés (p. ex. chaque année).

Collaborateurs

Collaborateur	Organisme d'appartenance
Patrick Cummins	Auteur, Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
William Perrie	Auteur, Direction des sciences du MPO, région des Maritimes
Charles Hannah	Auteur, Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
Diane Masson	Auteur, Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
Rick Thomson	Auteur, Direction des sciences du MPO, région du Pacifique
Lesley MacDougall	Rédactrice, Direction des sciences du MPO, région du Pacifique

Approuvé par

Carmel Lowe
Directeur régional
Direction des sciences, région du Pacifique
Pêches et Océans Canada

Le 8 janvier 2016

Sources de renseignements

Chen, Changsheng, Robert C. Beardsley, Richard A. Luettich, Joannes J. Westerink, Harry Wang, Will Perrie, Qichun Xu et al. 2013. Extratropical storm inundation testbed: Intermodel comparisons in Scituate, Massachusetts. Journal of Geophysical Research: Oceans. 118(10): 5054-5073. DOI: 10.1002/jgrc.20397. (Accessed January 11, 2016)

Deltares. 2014a. Delft3D-FLOW, Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, Including Sediments. User Manual Hydro-Morphodynamics, Version: 3.15.34158. Delft, the Netherlands.

Deltares. 2014b. Delft3D-WAVE, Simulation of Short-crested Waves with SWAN, User Manual, Hydro-Morphodynamics, Version: 3.05.34160. Delft, the Netherlands.

Hatch. 2015a. 3D Modelling of Potential Effects of Marine Structures on Site Hydrodynamics and Sedimentation. H345670-0000-12-124-0012, Rev. 0, May 5, 2015.

Hatch. 2015b. Pacific Northwest LNG Supplemental Modelling Report for 3D Modelling Update, H345670-0000-12-124-0013, Rev.0, November 10, 2015.

Kolomiets, P., Sorockin, M., Kivva, S. and M. Zheleznyak (2014). UCEWP-MOR-UN – A Numerical Simulator for Depth-Averaged Surface Water Flow, Sediment Transport and Morphodynamics in Nearshore Zone on Unstructured Grids.

MPO. 2015. Examen technique de la modélisation en trois dimensions des effets potentiels des structures marines sur l'hydrodynamique du site et la sédimentation découlant de la construction d'un terminal de gaz naturel liquéfié dans le nord-ouest du Pacifique. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Rép. des Sci. 2015/027.

Thomson, R.E., J.F.R. Gower and N.W. Bowker. 1977. Vortex streets in the wake of the Aleutian Islands. Monthly Weather Review. 105(7):873. DOI: 10.1175/1520-0493.

White, F.M. 1979. Fluid Mechanics. McGraw Hill, 701 pp.

Annexe 1 – Notes techniques

2.3 Modélisation des débits à proximité des grandes structures maritimes (bloc d'ancrage et tour sud-ouest)

Estimation de l'échelle de temps pour la propagation des tourbillons

Des expériences en laboratoire montrent qu'une propagation de tourbillons se produit périodiquement pour les courants qui s'écoulent contre un cylindre, avec une période d'oscillation calculée comme suit, $T = D/S_r U$, où *D* est le diamètre du cylindre et U est la vitesse du débit en amont. Il a été constaté que sur une très large gamme de nombres de Reynolds, le nombre Strouhal correspondait à $S_r \approx 0.2$ (White 1979, p. 279). Une propagation semblable de tourbillons a été observée pour des débits d'air à grande échelle s'écoulant contre des montagnes isolées, avec un nombre de Reynolds basé sur la viscosité turbulente plutôt que sur la viscosité cinématique du fluide (Thomson *et al.* 1977). En utilisant $D = 40$ m à titre d'échelle raisonnable pour la tour sud-ouest, et une vitesse du débit en amont de $U = 0.20 \text{cms}^{-1}$ à titre de vitesse représentative du courant de marée, nous obtenons $T = 16.7$ minutes avec $S_r = 0.2$. Ce résultat est comparable à la période d'environ 20 minutes de propagation des tourbillons observée au cours de la marée montante dans les simulations à haute résolution.

Estimation de l'échelle de distance pour la propagation des tourbillons

Une distance, L, sur laquelle on peut s'attendre à ce que les tourbillons se dissipent peut être estimée en supposant un équilibre des périodes entre l'advection de tourbillon et la dissipation par le frottement sur le fond. L'échelle de la première correspond à $U\Omega/L$, où Ω est une échelle pour le tourbillonnement, tandis que l'échelle de la dissipation du tourbillonnement correspond à $C_D U\Omega/H$, où C_D est le coefficient de résistance du fond et H est la profondeur. L'équilibre de ces deux éléments donne $L = H/C_D$. Si l'on prend pour hypothèse une valeur typique de $C_D = 0.0025$ et une profondeur représentative de la berge Flora au cours de la marée montante de $H = 2.5$ m, on obtient une échelle de distance de $L = 1$ km.

3.2 Modifications du total des solides en suspension (TSS) sur la berge Flora

Analyse de la figure 6-35

La figure 6-35 illustre une variation en fonction du temps du niveau de TSS avec ou sans structures maritimes dans une zone se trouvant dans le lit de zostère marine dans le cadre du scénario combinant les marées et les crues nivales. Dans les deux cas, on constate deux pics importants de TSS : l'un à la 110^e heure et l'autre près de la 200^e heure. Nous pensons que ces événements sont causés par les grands courants qui se produisent au moment de l'assèchement de la berge. La vidéo M-12 montre que le pic se produisant à la 110^e heure consiste en un niveau élevé et soudain de TSS (durant 10 minutes) vers la fin de la marée descendante, juste avant l'assèchement de la berge. Cet événement ne se produit pas dans la vidéo M-8 qui simule la marée descendante précédente, laquelle n'entraîne pas l'assèchement de la berge. Il semble probable que le pic important se produisant juste avant la 200^e heure présente la même cause. Nous supposons que ces deux événements dépendent d'une interaction entre l'algorithme qui traite de la manière dont la berge s'assèche et le calcul du TSS. Dans l'analyse qui suit, nous ne tenons pas compte de ces deux événements.

Cycle de marées de vives-eaux et de mortes-eaux

Le cycle de marées de vives-eaux et de mortes-eaux représente la variation naturelle de la hauteur et des courants des marées en fonction du cycle lunaire (nouvelle lune, premier quartier, pleine lune, dernier quartier) qui se déroule sur environ 29 jours. La figure 6-35 montre que l'ampleur du TSS est très sensible aux variations naturelles des courants de marée sur les 28 jours de simulation (en gros, un cycle de marées de vives-eaux et de mortes-eaux). On constate des niveaux de TSS élevés entre la 20^{e} heure et la 200^{e} heure, ainsi qu'entre la 320^{e} heure et la 520^{e} heure, mais une activité relativement faible du TSS entre la 200^{e} heure et la 320^{e} heure, ainsi qu'entre la 520^{e} heure et la 672^{e} heure (fin des 28 jours).

3.3. Modifications des courants à proximité des structures

Les simulations pertinentes sont celles du modèle à haute résolution autour de la tour sud-ouest et du bloc d'ancrage sud-ouest menées avec le modèle MORPHO.

Les vidéos M1 et M2 montrent des courants autour de la tour sud-ouest et du bloc d'ancrage sud-ouest pour la simulation portant uniquement sur les marées. Les courants autour des structures génèrent des tourbillons qui se propagent à partir de la structure et s'en éloignent en suivant les courants de fond. Les courants maximums à proximité immédiate des structures sont environ deux fois plus puissants que les courants de fond (courant de fond à environ 25 cm/s et courants maximums à environ 50 cm/s). Pendant la marée montante (M2) les courants intensifiés se chiffrent d'ordinaire entre 35 et 45 cm/s à une distance de 50 à 100 m des structures, et uniquement du côté sous le vent (en aval). La même chose se produit au cours de la marée descendante (vidéo M1). Les tourbillons (et les courants intensifiés) sont générés pendant environ 2 à 3 heures au maximum des marées montantes et descendantes. Dans l'ensemble, à chaque cycle de marée (soit 12,4 h), ces courants intensifiés durent 2 à 3 h à l'est, puis 2 à 3 h à l'ouest. La taille de la zone touchée par ces courants intensifiés représente une ou à deux fois celle de la structure. Les courants de marée sont plus faibles pendant la phase de marées de mortes-eaux du cycle de 29 jours, tout comme les courants intensifiés.

Pour la simulation de tempête présentant une période de récurrence de 50 ans, les courants intensifiés maximums représentent également le double des courants de fond (courants de fond de 40 à 50 cm/s et courants maximums de 90 à 100 cm/s), mais se propagent à de plus grandes distances des structures. Des courants de 80 cm/s sont présents à une distance de 300 à 500 m de la tour (vidéo M4) et des courants dépassant 80 cm/s se propagent à l'extérieur du champ de vision du modèle, soit à 500 m du bloc d'ancrage sud-ouest (vidéo M5).

Le présent rapport est disponible auprès du :

Centre des avis scientifiques (CAS)
Région du Pacifique
Pêches et Océans Canada
3190, chemin Hammond Bay
Nanaimo (Colombie-Britannique) V9T 6N7

Téléphone : (250) 756-7208
Courriel: csap@dfo-mpo.gc.ca
Adresse Internet: www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/

ISSN 1919-3815
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2016

La présente publication doit être citée comme suit :

MPO. 2016. Examen technique de la modélisation finale en 3D des effets potentiels des structures marines sur l'hydrodynamique du site et le transport des sédiments découlant de la construction d'un terminal de gaz naturel liquéfié dans le nord-ouest du Pacifique. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Rép. des Sci. 2016/007.

Also available in English:

DFO. 2016. Technical review of final 3D modelling - potential effects of marine structures on site hydrodynamics and sedimentation from the construction of the Pacific Northwest liquefied natural gas terminal. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Resp. 2016/007.